

电子设备的可靠性

(第二版)

J.C.Cluley 著

宋子寿 译

中国人民解放军第二炮兵技术学院

1984.1

680466

73.45
42-06

73.45
42-06

圖書

有英文版

Electronic Equipment Reliability

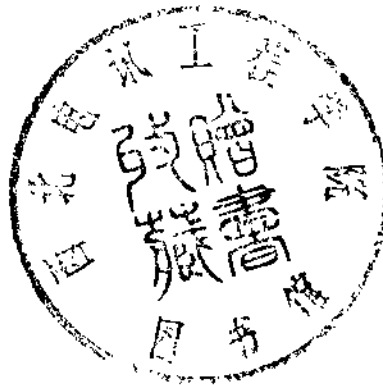
J.C. CLULEY

Senior Lecturer in Electronic and Electrical
Engineering University of Birmingham



Second Editio

10370856



存图书籍
供大家使用

傅佩琴

87.17

目 录

前 言	(1)
译 序	(3)
1. 绪 论	(4)
1.1 绪 论	(4)
1.2 历史综述	(4)
1.3 可靠性的定义	(5)
1.4 什么是可靠性值?	(6)
1.5 平均故障间隔	(7)
1.6 平均初次失效时间	(8)
1.7 可用性	(8)
1.8 不可用性或停工比	(9)
1.9 环境因素的效果	(10)
1.10 故障率和 MTBF 的一般定义	(11)
2. 数学基础	(14)
2.1 概 率	(14)
2.2 概率的经典定义	(14)
2.3 概率的相关频率定义	(15)
2.4 对立事件	(15)
2.5 复合事件	(16)
2.6 非互斥事件的联合概率	(17)
2.7 一般加法规则	(19)
2.8 条件概率	(20)
2.9 贝叶斯 (Bayes') 定理	(21)
2.10 概率图	(23)
2.11 二项式分布	(24)
2.12 二项式分布的示例	(27)
2.13 最可能的结果	(29)
2.14 泊松分布	(30)
2.15 泊松分布的示例	(31)
2.16 指数故障律	(34)
2.17 统 计	(35)
2.18 均 值	(35)
2.19 其它的定位测度	(36)
2.20 变 率	(36)

2.21 正态分布	(37)
3. 可靠性预测	(40)
3.1 系统细分	(40)
3.2 可靠性模型	(40)
3.3 串联系统的故障分析	(41)
3.4 串联系统的示例	(42)
3.5 并联系统	(43)
3.6 其它的并联组态	(44)
3.7 并联系统的示例	(45)
3.8 混合系统的分析	(46)
3.9 冗余的利用	(47)
3.10 暂时冗余	(48)
3.11 纠错码	(48)
3.12 多通道冗余	(50)
3.13 冗余水平	(52)
3.14 双重转换单元的利用	(54)
3.15 三重冗余	(55)
3.16 双重和三重系统的比较	(56)
3.17 四线逻辑	(58)
3.18 冗余系统的 MTBF	(59)
3.19 近似方法	(60)
3.20 集成电路	(61)
3.21 设计故障	(62)
3.22 软件故障	(63)
3.23 设计上的故障模式的作用	(64)
4. 元件故障数据	(66)
4.1 故障率随时间的变化	(66)
4.2 故障类型	(67)
4.3 影响故障率的因素	(68)
4.4 温度的效应	(68)
4.5 温度和故障率	(69)
4.6 计算内部温升	(70)
4.7 电压应力的效果	(71)
4.8 环境因子	(72)
4.9 故障率的计算问题	(72)
4.10 故障率数据的来源	(73)
4.11 置信限和置信度	(75)
4.12 计算试验结果	(75)

4.13	序贯试验	(77)
4.14	设备的环境试验	(78)
4.15	筛选和故障模式分析	(79)
4.16	筛选试验	(80)
4.17	对超可靠性的要求	(81)
5.	可靠性设计	(83)
5.1	可靠性设计	(83)
5.2	容许偏差的效果	(83)
5.3	开关电路的最坏情况设计	(84)
5.4	最坏情况设计的困难	(85)
5.5	统计设计	(86)
5.6	元件的选择	(86)
5.7	降额对可靠性的改进	(87)
5.8	元件质量的确定	(88)
5.9	机械设计	(89)
5.10	对干扰和噪声的防护	(90)
5.11	冗余的利用	(91)
5.12	可维修和不可维修系统	(92)
5.13	故障指示器的利用	(93)
5.14	数字故障指示器	(94)
5.15	模拟冗余	(94)
5.16	并联冗余	(95)
5.17	失效—安全电路	(96)
5.18	集成电路冗余	(98)
5.19	发展前景	(100)

前 言

第一个关于电子设备可靠性的详细论述，保证了武器装备中的通信和导航系统性能的改进。随后，这个技术发展成为更加严密的，并应用于其它许多非常重要的高可靠性的设备中，例如，民航的电子系统。

在最近 20 年期间，电子技术的发展，也提高了对可靠性的注意力。例如，电子数字计算机曾由一个稀罕的和不大可靠的设备发展成为大型工业和企业，以及成为许多过程和设备控制系统中心环节的基本管理设施。在更进一步引入了固态器件和集成电路后，降低了电子设备的价格，在性能价格比上，使得许多比较复杂的系统成为可利用了。这些系统对许多工业和企业的日益增长着的贡献的结果，它们的可靠性和可用性成为这些设备的用户所最感兴趣的事情了，在系统性能中，这些特性已引起了很大的注意力。

为此，对于涉及电子系统设计、试验或使用的所有工程技术人员是必需掌握，或者了解哪些是影响可靠性的因素，可以进行计算和确定的方法，其意义在于需要时可作改进。

本书适合于为获得学位和毕业文凭的高年级学生的知识水平。这个考虑是为了更适合于介绍设备可靠性，因为属于这方面的一切内容的详细考察，需要有关的电子工程方面的知识。其中有模拟和数字信号的传输和处理，电路和系统的设计、组成部份的特性和余裕度。虽然本书的取材不是专门为大学高年级生的一般水平，而这些内容将在后续的课程中作更详细地考察。

在本书中包含了有关概率的简单应用和某些统计方面的计算。由于这些内容没有包括全部工程数学，为便于学习，将有关内容归纳在本书第 2 章中介绍。此外还需要普通代数和简单积分知识。

在本书中提到的英国标准文本，可从伦敦 N19ND, 101 Pentonville 路，英国标准协会零售分店获得。

由于本书是在大量电子设备的研制，经历了大规模集成电路的巨大变化后写出的，因而也标志着朝向数字系统、数字测量和数字传输以及微处理机的应用的发展方向。所有这些变化理所当然地影响了可靠性的评价、高可靠性设备的设计以及冗余技术的利用的实际发展方向。

在本书的第 2 版的修订中，曾经采纳了有关可靠性方面的新内容以及随之而来的软件可靠性和调试等问题。

伯明翰大学

J.C.CLULEY

译 序

J.C.Cluley 是英国伯明翰大学电子和电气工程高级讲师。除本书外，著者还有几本关于电子技术方面的著作问世。本书保持了英国大学一般教材特点，内容丰富，论述严谨，注意更新，有一定的学术水平。正如著者本人所见，本书适合有关电子技术专业的高年级生选修课用。但就我国目前情况来看，不失为教师、研究部门和工厂等有关科技人员进修，更新知识的一本可靠性入门教科书。

随着电子数字计算机科学技术的普及发展，同时又逐步深入地解决了有关可靠性的数学模型和工具（概率与统计），再加上学科之间日益渗透，产品可靠性（可靠性元件是基础），甚至大系统的可靠性这方面的要求和探讨，已成为科学技术工作者，甚至组织管理人员（系统工程）刻不容缓的历史任务了。

之所以作上述强调，无非是呼吁大家重视（教育系统更不应例外）。对产品来讲，可靠性是一种密切连系产品寿命的而不是一般的性能。对大系统来讲，它是属于占主导地位的逻辑思维的范畴，影响深远。实际上，由于这门学科的发展结果，已大大改变了人们对自然科学的认识和开发深度。众所周知，冗余在分立元件和小规模集成电路中，是逻辑函数的简化对象（运用卡诺图和麦克劳斯基算法），但发展到大规模集成电路和超大规模集成电路，冗余便发展成为改进设备和系统可靠性的一门行之有效的专门技术了，这方面成功的实例不少，如计算机的 RAS 技术（可靠性 Reliability，可用性 Availability，可维修性 Serviceability），又如核电站的失效—安全技术（多重冗余保护系统），再如飞机的盲目着陆系统（3 重冗余）。这是有关系统组建，产品总体设计方面的例子。甚至在航空电子学中的双电源代替单电源，达林顿对管，乃至降额，降级等，都可从可靠性作出令人信服的解释。IBM 公司最近推出的新产品 2164A RAM，关键部份采用双联，因而减少了故障率（即失效率）。

还应当指出的是，可靠性是从属于系统工程的一门学科（技术）。它从某些方面统一了硬件和软件，自然科学技术与环境工程各自的要求，并使得科研、设计、生产和使用工程技术形成了一个闭环系统，有利于产品的更新换代。

探讨这些问题，是否有助于理论连系实际，有助于科学技术的普及与提高。

这是译者个人井底之见，既然书印出来了；便要向读者交代清楚为什么要推介这本书。谬误之见（以及错译），敬请读者赐教指正。

宋子寿

1983.11.30

致部队读者

部队中的科技工作者，按照社会分工，绝大多数属于使用工程技术范畴。本来科研、设计、生产和使用这是一个完整的闭环系统，而使用对技术装备来讲，它在这个闭环系统中，既是正反馈，又是反馈，是推动技术装备不断更新的主要信息源。遗憾的是，这个认识不一定能为人们，甚至包含我们本身在内所承认。

部队有的同志曾讲过：“自动化不可靠，还不如人工化”。这个顾虑不无道理，很值得警惕。俗话讲：“养兵千日，用兵一时”，技术装备在节骨眼上不灵光，给我们的事业带来的后果是不堪设想的。周总理生前曾指示我们：“稳妥可靠，万无一失”。要作到这一点，还必须认真努力才行。

本人谨祝愿部队科技工作者能在使用工程技术领域中有所创造，振兴中华。

宋子寿于西安市

绪 论

1.1 绪论

电子设备的可靠性在过去的 20 年中，正如仪器设备愈来愈复杂，以及应用于各种各样的事关重大的任务中，曾引起了人们日益增长着的注意力。由于普遍忽视了对于工程技术人员对可靠性系统的学习、设计和评价等方面的关心，目前作为专门问题来解决，仅仅是开始。之所以如此，其中无可怀疑的一个原因是涉及可靠性工程这一题目的内容范围太宽泛了。它包括了概率与统计，电子元件和器材的性能，电子设备的设计和构造，以及失效（故障）和损伤中的物理和化学知识，它还包括了在相当宽泛条件下的设备和元件的试验环境。为此，当一位电子工程技术人员涉及到设备可靠性时，他将遇到由其本身专业工程中所引起的专门的数学和学术上的问题。

1.2 历史综述

可靠性工程的许多成果曾对某些专门的问题和应用作了解答。概言之，在着手详细研究之前，我们将扼要地考察这个历史。较早的 1939-1945 年战争中，相对地给予电子设备的可靠性以较小的注意力。大多数设备是简单的，使用了相当少数的元件，为此，易于获得一个可接受程度的可靠性。对设备的额外要求是，工作于没有过量的热、振动或潮湿等有利环境中。

然而当战争环境激烈变化时，设备需要经受沙漠的酷热、寒冷或者潮湿的考验。这样，可靠性便成为发展很快和复杂的一门技术了。

这些环境条件因素增加了产生失效的可能，提出和研究可靠性的保证是显然可见的。要求为军队服务的设备在较长的期限内能满意地工作。一份美国战时设备的综合报告阐明了此问题的严重性；它表明了大多数的电子设备仅工作了约 1/3 的时间，用于修复和维护的平均费用约 10 倍于原来的购置费用。

一个突出的薄弱环节是电子管。为此，美国民航在 1946 年建立了一个研究小组来专门研究电子管的失效问题，并发明了一种更可靠的特殊类型的电子管。紧接着在其它电子元件中开展了同样的研究工作。1952 年美国政府筹建了第一个电子设备可靠性咨询小组 (Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment AGREE)。5 年以后这个小组提出了可靠性的技术要求和试验的报告。这个报告获得了政府的批准。从此军用设备产品在技术要求上便有了有关可靠性的原则依据，随后又扩展到民航系统中。

卫星和其它空间运载工具的发展，不断提高了对电子设备可靠性的要求，在这方面开展了更深入的研究和投资。

在英国从设备的使用维修出发所发明的特种类型管子的过程是相似的。这类管子企图比民用的产品更为可靠，且其技术性能更加完善。后来在特种类型器件中引入了晶体管，并且扩大到民用部门，如电话这样高可靠性的要求来讲是重要的。

在过去的十年里的电子消费领域值得注意的发展动向是，大量地增加出租而不是卖出电视机。设备的可靠性，对于出租阵地来讲是十分重要的，因它很大程度决定了可靠的利润。大批量接收机的可使用性，由同一服务机构，记录所发生的全部故障，根据产品暴露出来的缺陷，将此信息反馈到制造厂家，改进产品质量。

目前，最大的应用很可能是横渡大洋的海底电缆的水下增音器，它应是超过20年期限的高可靠性，藉以保证电话局回收其投资。

在这种条件下，由于所需要的可靠性计算方法，应准备对元件付出相当高的代价。

1.3 可靠性的定义

术语“可靠性 (Reliability)”，当应用于工程技术设备或系统时，现在给出一个附加于其质量上的一个正确包义，“在特定环境中，可靠性系统将在一个特定时间内，工作于一个约定等级的功能 (Performance)”。这样，一部小型计算机的可靠性，在环境温度为 25°C ，无振动，在200小时的时间内可给出80%，为所定义的一个完整条件，它也可以在电源电压和相对湿度上提出最大的变化范围。

完善地规定整个环境条件是重要的，即电和电磁情况，温度及其变化，气候上的条件，如盐雾、冰层、尘暴、湿度，以及力学条件，如振动的频率和幅度。电的环境包含输入信号的满幅范围和干扰，电源电压的变动，所有开关的瞬时容量，有关的输出负载变化。当设备靠近一个产生大量电磁场的其它部件时的电磁环境是重要的。对于空间和核电子，也需要规定其放射级或者设备可以吸收的总的剂量。

上述可靠性的一般定义指出，对某些设备所引用的每一数值，仅涉及其工作时间、规定的功能级和工作条件。在许多情况下，当用户不是希望设备工作于此规定环境条件时，则需要从可资利用的数据中，计算出一个在不同条件下的可能的功能。虽然有一定的法则可以遵循，但是设备环境变更时的可靠性的效果，往往是不可预测的，特别是利用外推法 (extrapolating) 时更是如此。

为此，假设我们给出了环境温度为 70°C 和集电极功耗150mW和300mW的给定型号晶体管的可靠性时，我们可以相当自信地计算出一个在相同时间内，功耗为200mW的可靠性，然而，企图计算出功耗为450mW的可靠性，就很可能导致错误，这是由于超越了不能忽视的最高功耗，这个可利用的信息。

虽然，上述可靠性的定义是易于理解的，但它忽略了有关的一个因素，就是设备的老化 (age)。为了满足一个规定时间内无故障地工作，设备应在观察的时间起始便正确地工作，但从定义中对于始于其寿命的新设备和已经工作了相当长的一段时间的设备以及发生故障后修复的设备之间却没有区别。新设备通常需要积累一些时间来判断和修复设备本身的小的缺陷。所以，当处于工作时间的开始阶段，设备的故障率显著地下降，此后随时间变化很慢。大多数用户关心的是设备的总体寿命，而不是工作时间开始的少数几百小时。在这种情况下，经历了一定的开始时的“老化”周期后，可以提出设备的可靠性。这也说明了设备在经历了初始的稳定时间后，可以获得预期的功能。

1.4 什么是可靠性值？

可靠性仅是电子设备或系统的一个特性，当从一定数量的设计中选择其中之一时，应考虑的特性。从用户的观点来看，最佳设计的决策准则是最小化的总的寿命费用。这个过程包括计算购买设备和备份件的费用，例行维修(routine maintenance)和更换用的备份件的费用，以及当设备没有预警信号情况下，发生了故障，为了修复，需扣除的不能工作的费用。当此设备在总的寿命内，上述所有项目的费用预算作为一个标准，并认为是所给出的最低的总的寿命费用时，则设备的可靠性成为设计中的一个重要参量。当其增加时，将降低更换用备份件和整个维修费用，然而，过多地提高可靠性时，设计和开发以及开始的购置设备费用将迅速增长。为此，过份地提高可靠性将不可能获得经济上的最好效果。

图 1.1 表明费用与可靠性间的一般关系。开始购买设备的价格反映了设计和开发的费用，它包括了为改进可靠性和更为可靠的元件（这样更加昂贵）的费用。此曲线也决定于产品的批量，批量愈大，单位的费用就小，从而也降低整体的费用。

在一个由几个单元组成的设备中，为了提高设备的可靠性，保持有少数在设备有故障时，为了更换用的备份件是必要的。

所有复杂和价值昂贵的电子系统的用户，总希望有一个如图 1.1 所示的费用分析方案。此图可计算每一方案的总的寿命费用以及选择最低费用方案。遗憾的是，在实际工作中，往往只能获得少数几个孤立的点，而不是如图 1.1 所示的那样详细的信息。

收集信息的困难之一是准确地预算维修费用。然而，同一设备的其他用户，生产工厂以及持有设备的故障统计和可能出现的故障，故障的修复时间的维修费用，维修单位和维修人员的技术水平均属有用的信息源。为此，用户应考虑上述各个方面，来决定几年或更长时间的维修费用。

特别注意安排那些在设备总的寿命中必需保证的备用件和可以忽略的项目。

然而，在可供选择的建议之间，有充分的精确度的某些环境条件中，可较易地获得图 1.1 的详细信息。其中首先是利用备份或后援设备所获得的超可靠性的，由曲线所覆盖的多数设计的冗余系统。

这样的安排可作为基本系统，即需要用来实现所分配任务的最小量设备，它比最佳可靠性要小些。而更为可靠的系统可采用双联、三联等组合或基本系统的各种型式。在每一情况中，其费用和可靠性是和基本系统中的因素有直线的关系，图 1.1 中的连续曲线成为一系列离散点，每一个点对应于响应的每一等级。

当此设备有一较长的发展阶段时，可获得一个关于曲线上升的初始部分的更详细的情况。图 1.1 曲线不是由相同设备的一系列设计中，而是由相同的原始设计开发过程中的每一

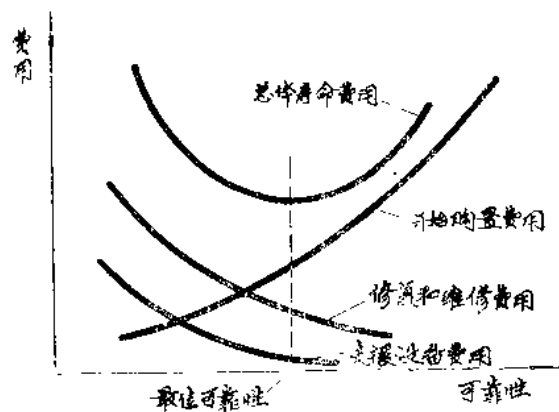


图 1.1 费用和可靠性间的关系

连续步骤所描绘。当它明显地达到最佳可靠性时，则此开发等级正常地结束，但如缺少时间和费用，则可在早些阶段中，结束此设计。

选择可靠性的最佳等级的总体寿命费用极小化准则的结果是对于长寿命设备在故障修复费用或者收入损失上的非常高的可靠性要求。这样设备的例子是电子电话交换机，水下电话增音机和通信卫星。

然而，另外有些系统法定要求一个很高程度的可靠性，因其失效可危害人的生命。这种情况是在能见度很差下的飞机的自动着陆设备，或在发生事故时，能自动关闭的核反应堆。在这些情况中，最小的可接受的可靠性是由操作规程所确定，设计者只能在此约束下，力争使总体寿命费用为极小。

如同宽频带电子示波器，大功率设备以及在技术上可行的精密设备，这些大量的设备增加了很大程度的高可靠性要求。这样，有了一个不断发展高可靠性的持续压力，以及能从现有的组成部分中产生更高可靠的系统设计技术。

1.5 平均故障间隔 (Mean Time between Failures)

虽然在 1.3 节中所定义的可靠性，通常是说明性能的指标，但它存在一个缺点，就是对设备需要规定一个指定的工作时间。如果同一设备工作于不同的时间，其可靠性将不同。这样，一种设备依赖于其使用时间，将有一个范围大的不同值的可靠性。显然，在规定条件下，不依赖于工作时间的其它设备性能的计算也是很有用的。在不同工作时间的不同系统间的比较便是例子。例如，假设我们在 200 小时工作时间的可靠性为 67% 和 100 小时工作时间的可靠性为 82% 之间来进行选择时，那吗比仅仅选取两数中较大者需要考虑的问题要更多一些。这时更为有用的性能的计算是不包含观测时间因素的平均故障间隔 (MTBF) 时间。

系统的 MTBF M 可在一个发生了 N 次故障的总的时间 T 内的试验来计算。假设每次故障被修复后，对设备重新进行试验，且修复时间包含在总的试验时间 T 内。则观测的 MTBF 给定为

$$M = \frac{T}{N}$$

此观测值不一定是真实的 MTBF，因仅在设备的总的寿命中，观测了其中的一个抽样。为此观测值包含了一个随机采样误差，对此误差允许从试验数据中扣除。

另一种表示设备可靠性的方法是故障率；即，每单位时间的故障数。对许多电子系统来讲，在设备的工作寿命的多数时间内，故障率近似为常数。此种情况下，故障率为

$$\lambda = \frac{1}{M}$$

然而，实际上 λ 随时间变化，需要多于一个参量来表示 λ 为时间的函数。这样，MTBF 可以是 λ 的更为复杂的函数。

M 常表示成小时数， λ 的相应单位为故障/小时。对于元件， λ 的数值极小，其单位可选择一个更为方便的数，如故障率可采用每 1000 小时的百分数，每 10^6 小时故障数，或每 10^9 小时故障数。例如，一个 MTBF 为 2000 小时系统的故障率为

$$\frac{1}{2000} = 0.0005 \text{ 故障/小时}$$

或 每 1000 小时 50%

或 500 故障/10⁹小时

在前节中定义的 MTBF 的概念，可应用于其故障元件或单元可通过置换来修复，而其它条件相同的一切类型的设置。当忽略观测时间时，MTBF 数值较大的设备说明有更大的可靠性。为此，MTBF 提供了一个更为方便的可靠性指标。

仅仅需要限定的是故障的修复时间。如果设备间的所有条件都相同，则具有较大值的 MTBF 的设备，将被选优。然而，应当说明的是一个较短的修复时间，较之一个较长的 MTBF 更为重要，且需要其它的可靠性的计算。这些将在 1.7 节中讨论。

1.6 平均初次失效时间 (The Mean Time to Failure)

MTBF 是用来计算可修复设备的可靠性的；而对于那些不能修复的“报废 (Throw-away) 件”，如电子管、电阻、电容器和晶体管等，其正确的计算方法，应是平均初次失效（出故障）时间。

这可由寿命试验的结果计算如下。令一个集合的 N 项目，直到全部失效的试验中，其失效时间为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i \dots t_n$ 。则所观测的 MTBF 给定为

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

如作为计算 MTBF，则试验寿命应处理为仅是一个产品批量，所观测的 MTBF 将属于采样误差。设 λ 和时间无关，则故障率如前所给为

$$\lambda = \frac{1}{M}$$

例如，现有试验直到失效的 6 个单元，其失效时间分别为 320, 250, 280, 290, 310, 和 400 小时，总的试验时间为 1950 小时，则 MTBF 为

$$M = \frac{1950}{6} = 325 \text{ 小时}$$

1.7 可用性 (Availability)

诸如数字计算机这样的电子系统的管理者，每周要处理大量工作，涉及比设备的可靠性还要多的因素。可靠性仅告诉我们在一定期限内的作业，将处理为机器没有故障的概率。虽然这是一个有价值的信息，而管理者还需要一个用来计算由于修复故障的时间损失的性能指标。这样便可决定计算机每周能处理的工作量。

假设计算机每周接通 100 小时，管理者需要了解这当中，可资利用的有效工作时间，以及不能利用的机器不工作的时间。此相关的性能指标是系统的“可用性 (Availability)”或“开工比 (up-time ratio)”。这可根据机器的值机日志的记录来计算。在值机日志中，给定时间内，机器的全部接通时间分成两类——即，机器正常工作的“开工 (up-time)”和当机器处于故障或修复时间“停工 (down-time)”。

所观测的整个周期为 $U + D$ ，我们定义可用性或开工比为

$$A = \frac{U}{U + D}$$

不可用性 (Unavailability) 或停工比为

$$B = \frac{U}{U+D}$$

实际上，这些表达式可作某些修改。例如，通常在计算之内包含了例行维护或预防性维护 (Preventive maintenance) 时所消耗的时间，因其实现是在计划工作小时之外。然而，对于连续工作系统，维护时没有备份时间可资利用，且用于此目的任何时间均将计算为停工时间。

元件失效率为常数的一个理想系统，其可用性有一非对称值为

$$A_{\infty} = \frac{M}{M+R}$$

此处 $M = \text{MTBF}$

$R = \text{平均修复时间 (Mean Repair time)}$

一开始可用性将大于 A_{∞} ，且随时间降低到 A_{∞} 的稳定值。

然而，在实际上，每一复杂电子系统几乎都呈现出一个初始上升的元件故障率的初始“暂时 (teething)” 或者试运行故障。为此，观测可用性时，一般是在初始故障被排除后的几周的设备的早期寿命期间内。

稳定状态的可用性 A 的进一步表达式，可从故障率 $\lambda = 1/M$ 和修复率 $\mu = 1/R$ 而获得。为此，

$$\begin{aligned} A_{\infty} &= \frac{M}{M+R} = \frac{1}{\lambda} / \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \right) \\ &= \frac{\mu}{\mu + \lambda} \end{aligned}$$

此表达式的单位，对 μ 为每单位时间的修复次数 (repairs per unit time)，对 λ 为每单位时间的故障数 (faults per unit time)。

上述定义的可用性，也可用概率来解释。设在给定时间内的可用性为 A ，则在系统时间内的处于工作状态的任一随机瞬间的概率也为 A 。

在监视和安全系统的分析中，这个说明是重要的。这些系统要求正常地连续工作，而不是仅仅在设备出故障或失灵 (mal-function) 的罕见事件中所需要的功能。此性能的重要计算要求便是系统的可用性，即在设备发生故障的某一瞬间，仍能正确工作的概率。

1.8 不可用性 (Unavailability) 或停工比 (Downtime Ratio)

一个系统的不可用性也可采用和可用性定义相同的方法来定义；它是系统在不工作状态下的时间比。

为此，利用开工时间 U 和停工时间 D 来表示不可用性为

$$B = \frac{D}{U+D}$$

此处故障率为常数，用 M 和 R 表示稳定状态的不可用性为

$$B_{\infty} = \frac{R}{M+R}$$

最后，用修复率 μ 和故障率 λ 的常数值，有

$$B_{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

注意由定义知 $B + A = 1$ 。

如上所述，一个具有故障率和修复率为常数值理想系统，有一个不可用性的瞬时组成部分加到 B_0 的非对称值上。B 的初始值将低于 B_0 ，此瞬时部分值和 A 的瞬时部分值相等反号。

A 的值通常是两个值中更为重要的，A 的完全表达式表明瞬时项在时间 $t = 4/(\lambda + \mu)$ 内，非对称值 A_0 减少约 20%。因通常 λ 比 μ 小，此时间实际上等于 $t = 4/\mu$ 。

A 和 B 对时间的变化如图 1.2 所示。当然，是在故障率和修复率为常数值理想状态下的情况。

实际上，通常故障率在初始期较大，当初期故障被排除后，便降低到近似常数等级。更进一步，在使用的早期阶段，修复率如同维护人员对设备的熟悉掌握程度是随时间增加的。由于这两点理由，初始阶段的可用性很可能比尔后的稳定状态小。

1.9 环境因素的效果

定义一个可靠性需要了解 3 类信息，试验期、功能等级和环境条件。后者包含设备的整个物理环境，也有通常对可靠性有重大影响的电气和电磁环境。

物理因素，它应特别包含温度，加速度，湿度，大气因素如雨、雪、尘暴和环境压力，以及腐蚀条件如暴露在海水或酸雾中，在这当中最重要的，当首推温度，几乎所有电气元件的故障率都是随温度增加的。设备设计人员常常采用强迫冷却，防震支架和密封等来保护其设备，但这些防护措施和电路上电的要求可能出现矛盾，需针对实际情况采取某些折衷。

电的条件应包括电源电压的变化（交流电的频率和波形），可能发生电源线上的一切瞬时的时间和振幅的最大偏差，以及电负载的详细情况。某些易受电磁辐射影响的设备，则应给出所有相关频率上的最大高频场强。这点对于需要靠近大功率无线电发射设备工作的装置更为重要。对于低频场有干扰影响的设备，应给出一个相同环境的最大感应场强的资料说明。此问题是由于音频设备或灵敏交流电桥的低电平输入变压器所引起的。

某些特殊类型的设备可能包括影响可靠性的非一般条件，这些条件的整个细节均应在可靠性设计的说明中。例如，用于监视核反应堆的激烈的离子辐射和慢中子轰击性能的设备，其可靠性说明中，应包括有关这方面的整个环境条件。

设备可能遇到各种环境因素。自然，这将使设备的试验复杂化。例如，温度、湿度和电源电压的变化起伏同时影响设备。任何企图使试验设备每次仅受一种干扰，这样对可靠性都将给假的和看起来比较有利的结果。

一个更为复杂的现象是产生最大故障率的时机，不是明显在大多数使用场合下，也不包含在一个正常的试验方案中。例如，某线绕电阻在高湿度和高的室温下能勉强地工作，但当它工作于寒冷和潮湿和减少电负载的条件下，由于电解腐蚀作用，便将很快地出现故障。

本章打算介绍有关可靠性工程以及解释用到的某些重要术语。为了完整起见，下一节将

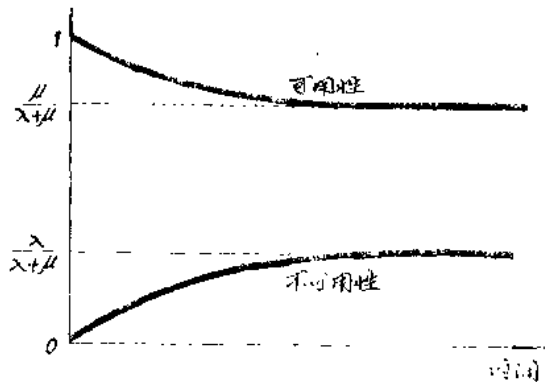


图 1.2 故障率为常数值系统成不可用性和可用性对时间衰变化

给出一个故障分布函数的正式定义，可靠性和故障率之间的关系，以及由可靠性和故障分布函数来计算 MTBF 值。这些在后续各章中用到的表达式，今后将较详细地介绍。

1.10 故障率和 MTBF 的一般定义

在给定时间上，系统的故障概率 $F(t)$ 是在同一时间上的系统可靠性 $R(t)$ 的补，因无其它可能，且此两者为相互排斥。

为此
和

$$F(t) + R(t) = 1$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

通常取 $t=0$ 作为工作时间的起始。

从 $F(t)$ 可推导出一个对时间的重要函数。因 $F(t)$ 是概率，其导数是一个概率分布函数，定义为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

在时间为 0 到 t 的期间内，此故障概率为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

可从这些表达式中，考虑始于时间 $t=0$ ，推导出一个试验项目为 n_0 的故障率。

在一定时间后，继续存在 n_s 项，则 $n_f = n_0 - n_s$ 代表了故障项目。

此时元件的故障率因此为

$$\frac{dn_f}{dt}$$

这也可解释为单位时间内的失效元件数。因些时试验中还保留有 n_s 项，故每一元件的故障率为

$$\lambda = \frac{1}{n_s} \times \frac{dn_f}{dt}$$

但在时间 t 的可靠性，可表示为 0 到 t 区间内无失效的概率。因从初始项目数 n_0 中，继续保留有 n_s 或 $n_0 - n_f$ 项，而可靠性可等于继续保留项目的比例：

$$R(t) = \frac{n_s}{n_0} = 1 - \frac{n_f}{n_0}$$

两端分别取导数

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{n_0} \times \frac{dn_f}{dt}$$

和

$$\frac{dn_f}{dt} = -n_0 \frac{dR(t)}{dt}$$

为此，有

$$\lambda = \frac{1}{n_s} \left(-n_0 \times \frac{dR(t)}{dt} \right)$$

现在

$$R(t) = \frac{n_s}{n_0}$$

所以有

$$\lambda = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.1)$$

这是一个关于 λ 对时间的变化，没有假设前提的完整的一般表达式。这对 $R(t)$ 有某些制约，然而，因 λ 应为正（失效项目当然不能还原！），为此， $R(t)$ 应是 t 的单调递减函数。

λ 的表达式积分后，给出

$$\int_0^t \lambda dt = -\int_1^R \frac{dR(t)}{R} = -\log_e R(t)$$

因于 $t=0$ 时， $R=1$

由此

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right) \quad (1.2)$$

通常考虑 λ 为常数的简单情况。

所以

$$R(t) = \exp(-\lambda t)$$

在此情况下

$$f(t) = \exp(-\lambda t)$$

在统计论中，用于求密度函数 $f(t)$ 的平均分布方法是计算 $f(t)$ 的一阶矩，即 $t \times f(t)$ ，并从 $t=0$ 到 $t=\infty$ 积分。这便给出由分布所覆盖的全部平均故障次数。换言之，MTBF 或不可修复项的 MTTF。

为此用分布函数 $f(t)$ 来表示的 MTBF 或 MTTF 的一般表达式为

$$M = \int_0^{\infty} t \times f(t) dt$$

现由 $f(t)$ 的定义

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

为此

$$M = -\int_0^{\infty} t \times \frac{dR(t)}{dt} \times dt$$

由部分积分给出

$$M = -\left[t \times R(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt$$

现在 $t=0$ 时， $R(t)=1$ ，所以 $t=0$ 时， $t \times R(t)=0$ 。当 t 增加时， $R(t)$ 减小，常可找到一个 K 值，使得 $R(t) < \exp(-Kt)$ 。为此因

$$\lim_{t \rightarrow \infty} t \times \exp(-t) = 0$$

当 t 增加时， $t \times R(t)$ 也驱向于 0。

这给出 M 的一般表达式， λ 作为一个时间的函数

$$M = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.3)$$

对 λ 为常数时，可简化为